

ANSYS®



ANSYS中国技术大会  
中国·上海

# ECE等效电路模型提取与协同仿真

童辉 /高级应用工程师

# 内容提要

1

ECE等效电路模型提取与协同仿真简介

2

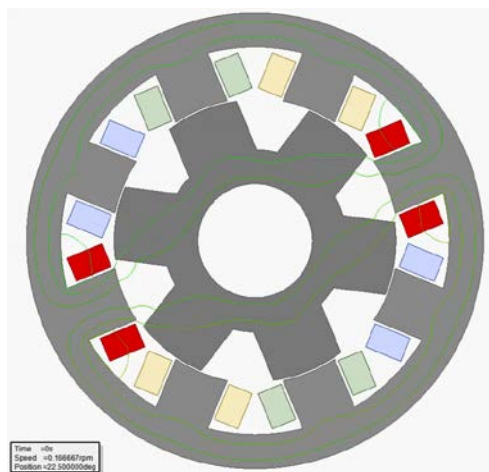
ECE等效电路模型提取与协同仿真方法

3

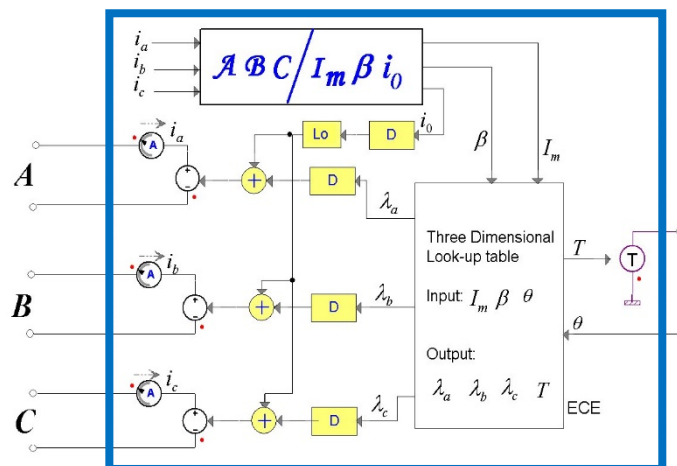
Demo

# ECE :Equivalent Circuit Extraction

- 分布参数 → 集总参数 (  $B, J, D \rightarrow \text{Flux, Current, Torque}$  ) ;
- 高速度 : 电路模型 ;
- 高精度 : 以场分析为基础 ,
- “黑盒子” 系统仿真分析模型。



电气 ←————→ 机械



# 传统方法

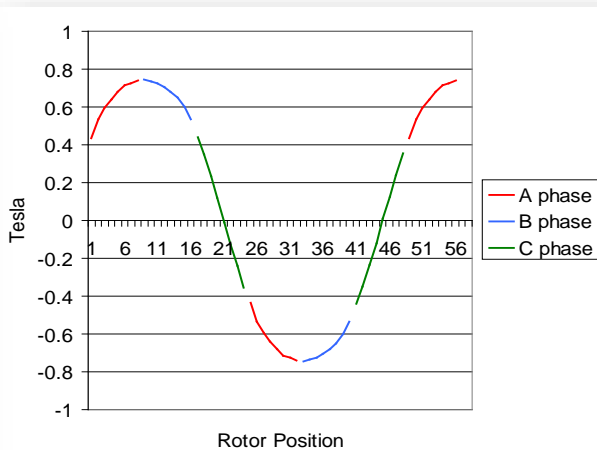
## 提取步骤：

- 将电流、位置等参数化设置为可变参数，建议使用DSO；
- 手动完成“最小周期”参数化扫描设置；
- 手动完成“全周期”数据还原；
- 手动完成3相（ABC）到2相（ $I_m \delta$ ）坐标变换。

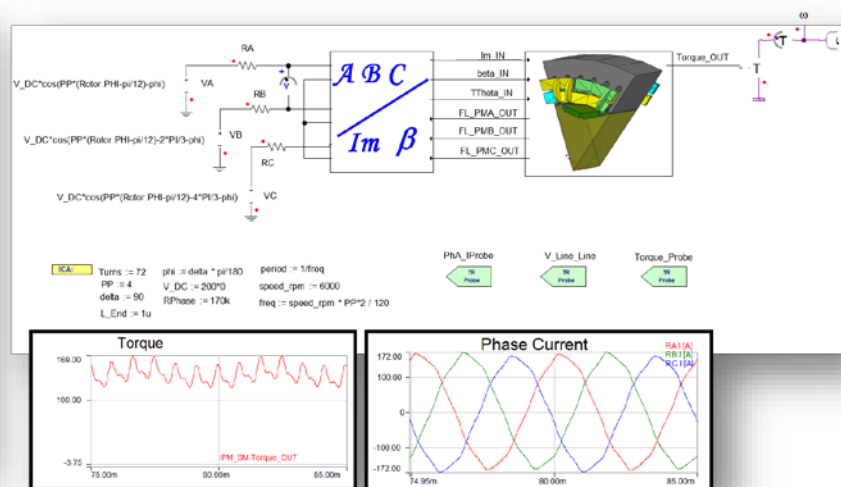
### 参数扫描

Setup Sweep Analysis			
Sweep Definitions		Table	General
*	Gamma	Im	Thet
1	0deg	-10A	0deg
2	0deg	-10A	10deg
3	0deg	-10A	20deg
4	0deg	-10A	30deg
5	0deg	-10A	40deg
6	0deg	-10A	50deg
7	0deg	-10A	60deg
8	10deg	-10A	0deg
9	10deg	-10A	10deg
10	10deg	-10A	20deg
11	10deg	-10A	30deg
12	10deg	-10A	40deg
13	10deg	-10A	50deg

### 全周期数据还原



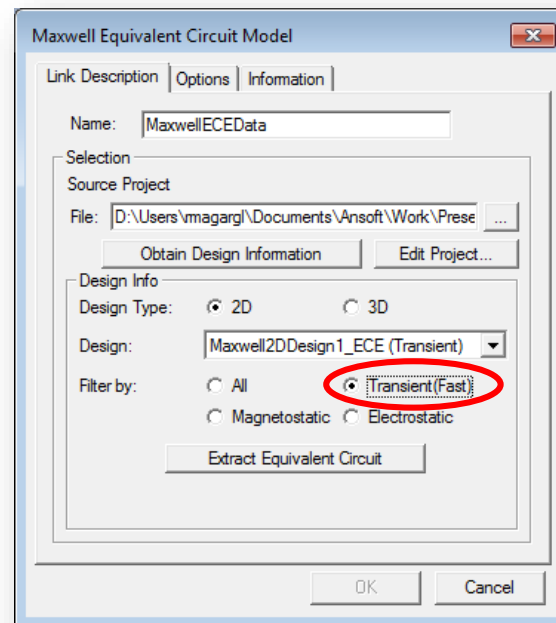
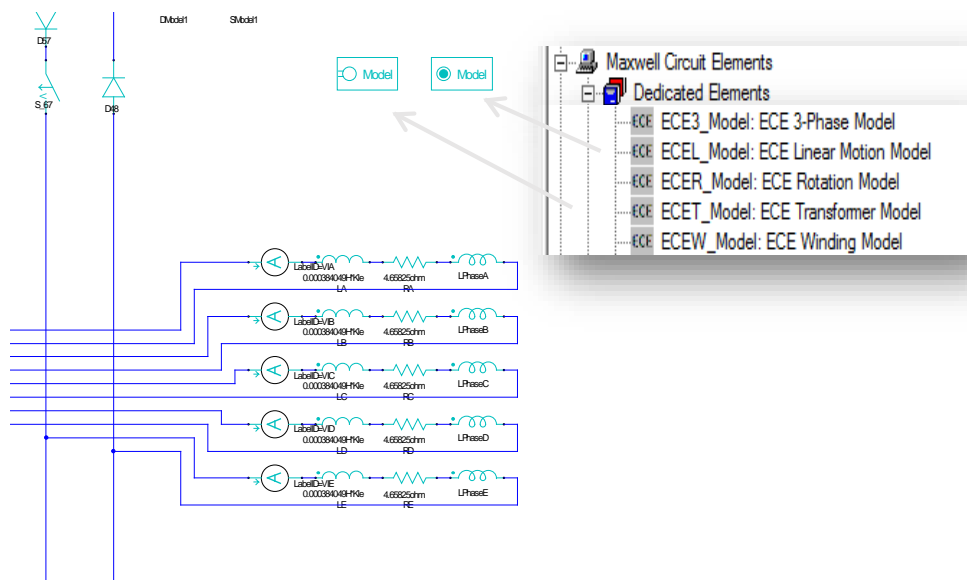
### 电路与系统集成



# 新方法

提取步骤：

- 不需设置 “Optimetrics” 设置
- 不需要使用 DSO
- ECE参数扫描激励设置为外电路
- ECE模型和Simplorer可实现动态链接



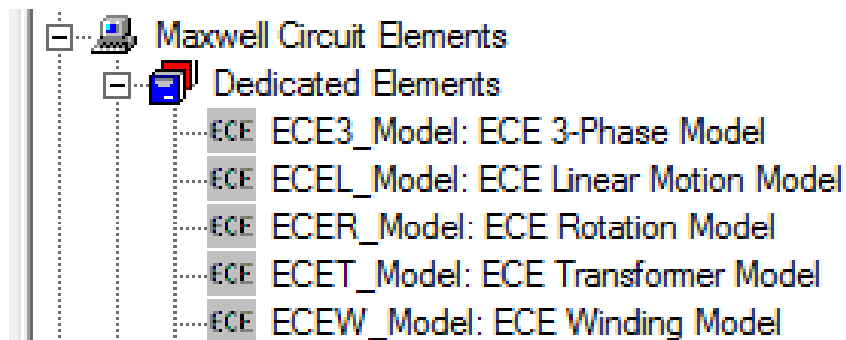
# 新的ECE模型提取特点

## ■ 通过 “Transient” 求解器提起模型的静态参数

- 用户可保留绕组配置，匝数
- 用户可保留对称性设置
- 能够提取直线/旋转模型的ECE模型

## ■ R16支持的模型

- 旋转模型(ECEW,ECE3,ECER)
- 电感(ECEW)



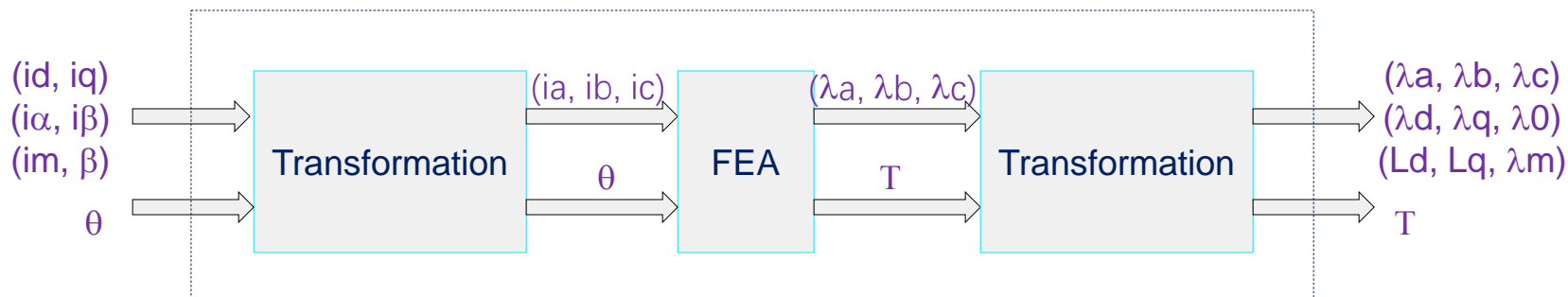
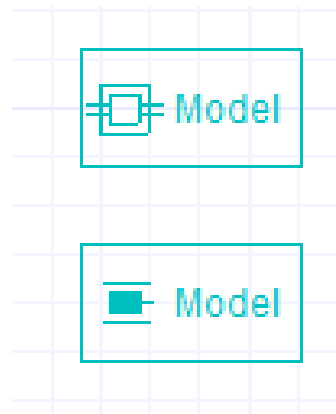
# R17扩展到直线运动和变压器

## ■ R17模型提取扩展到直线运动和变压器

- ECEW\_Model: one winding model (R16)
- ECE3\_Model: three-phase model (R16)
- ECER\_Model: rotation model (R16)
- ECEL\_Model: linear motion model (R17)
- ECET\_Model: transformer model (R17)

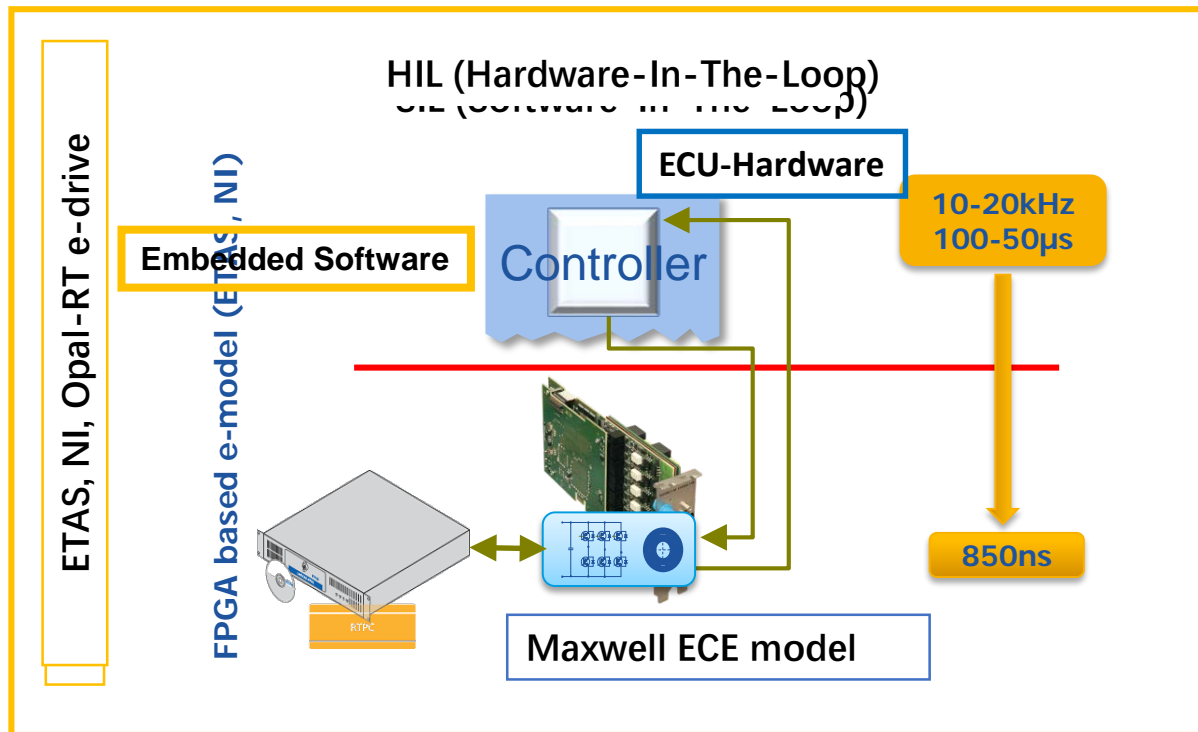
## ■ ECE 模型格式

- Simplorer model in file .sml
- Look-up table output
- VHDL model



# 基于模型设计的有限元分析

- 工程需求：MIL, SIL, HIL（通过基于模型的设计扩展到系统）
- Maxwell功能：ECE（等效电路输出）



该功能在R17中将会拓展至变压器和作动器



# ECE等效电路模型提取与协同仿真方法

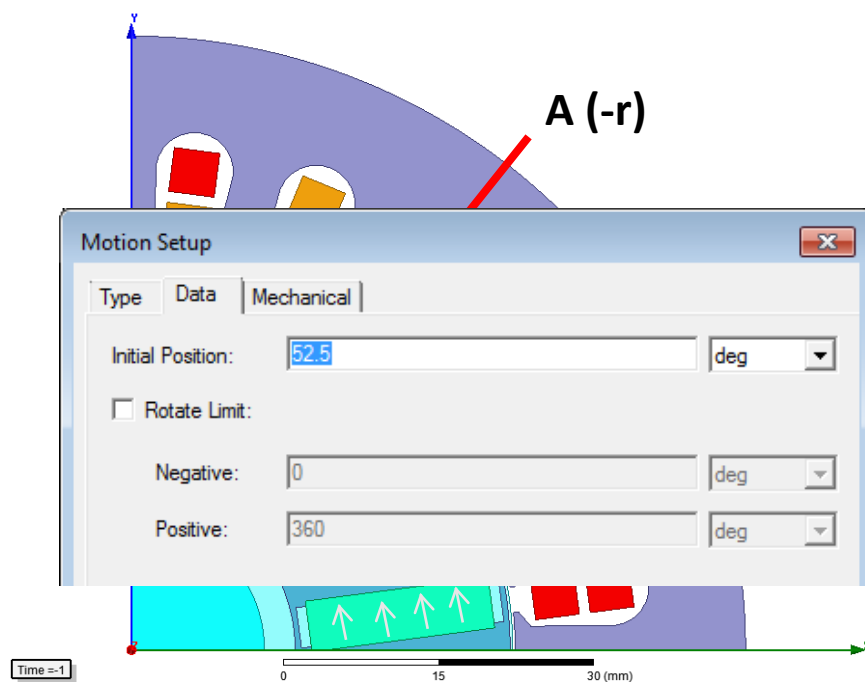
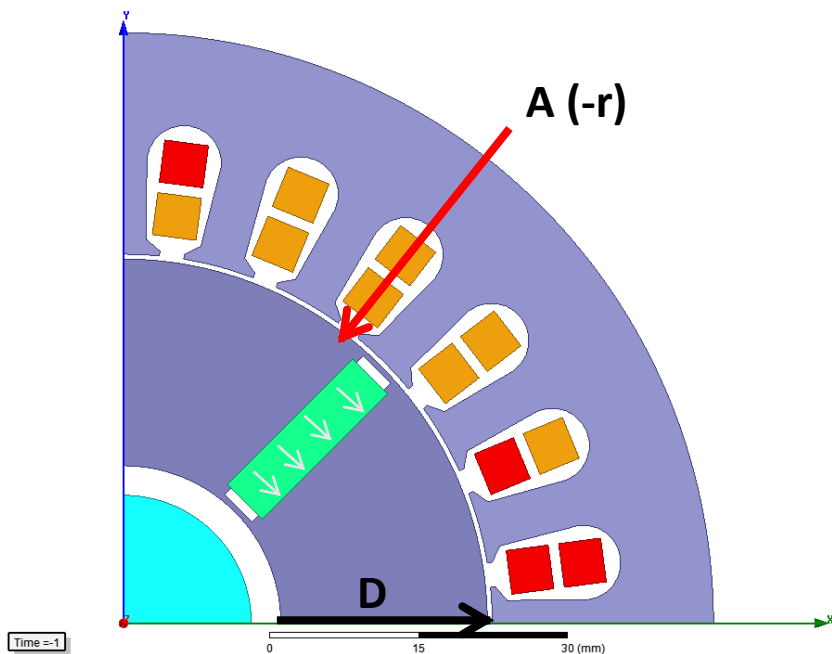
---

1. IPM电机
2. SRM电机

# IPM电机：设置初始位置对其角

## 1. 将电机D轴与A相绕组的轴线对齐

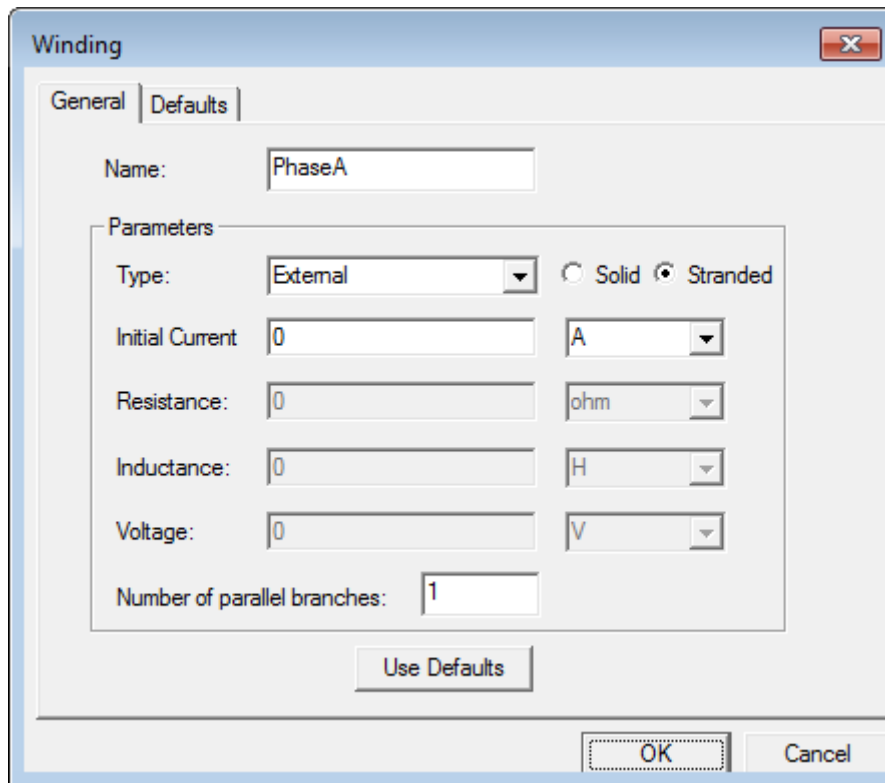
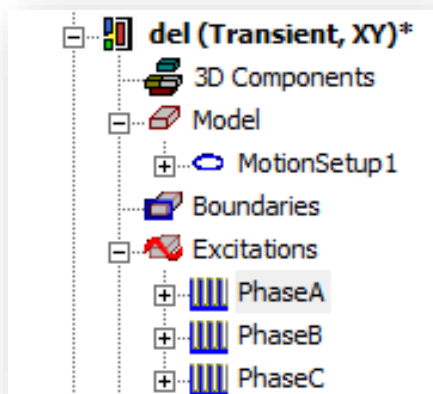
- 保持其他瞬态参数设置不变，如绕组、模型深度、对称性等。



# IPM电机：将激励设置为外电路

## 2.将激励的连接方式修改为外电路

- 这一步设置与电机实际需不需要设置外电路无关，ECE提取过程受外电路控制。



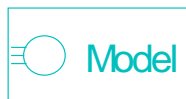
# IPM电机：编辑外电路

## 3.编辑外电路

- 删除从RMxpert自动生成的Maxwell外电路所有部件；
- 添加” ground “模块；
- 对三相电机添加 “ECE3 ” 模块进行电流扫描；
- 添加 “ECER” 模块尽心位置扫描。

ECE3\_Model1

ECER\_Model1



Model



Model

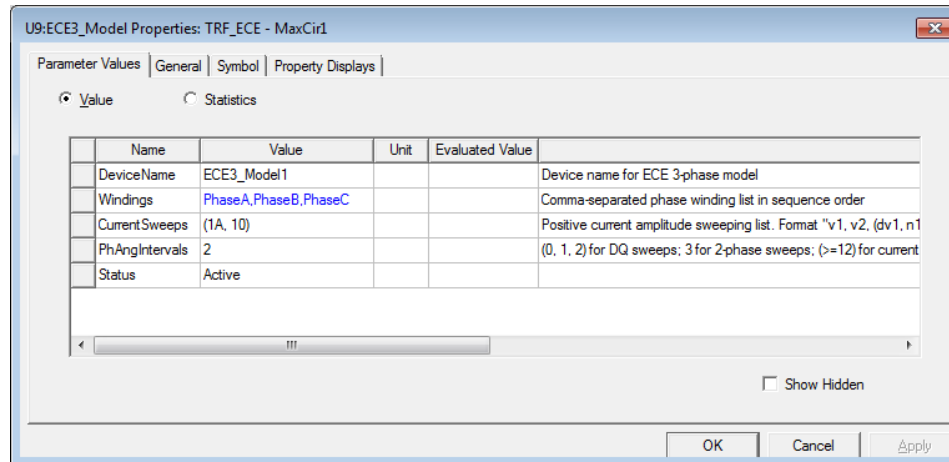
2.添加ECE模型

1.添加地 

# IPM电机：参数化扫描设置

## 4. ECE3参数设置

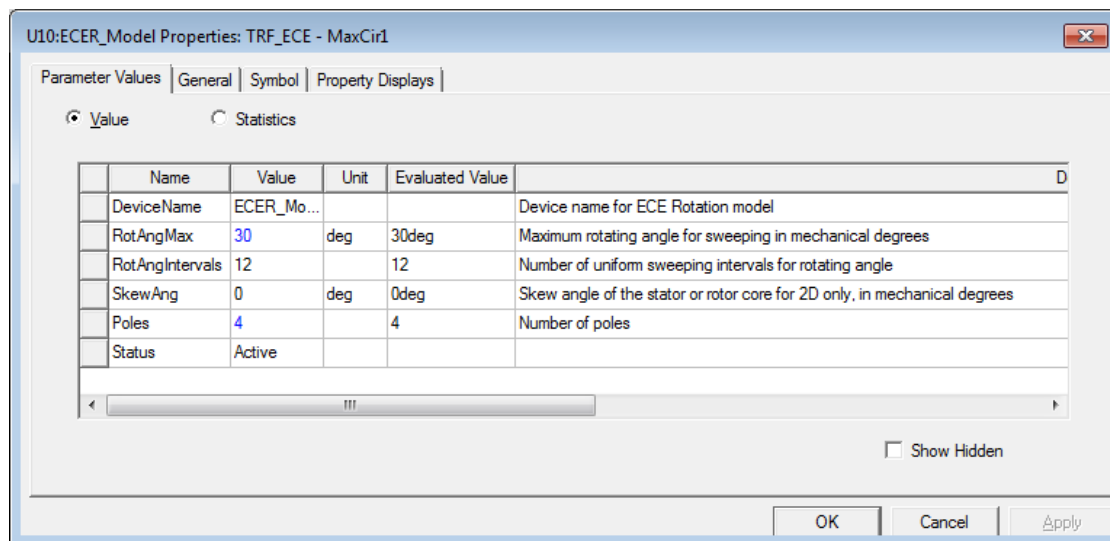
- 设置三相绕组名称，必须与Maxwell设置对应；
  - 设置电流扫描区间 (1A,10)，10个点，步长1A；
  - Set “*PhAnglIntervals*” 为 2, 软件内部将对DQ轴电流进行 (+~-) 的对称扫描，如下列所示：
- $I_d = [-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]$   
 □  $I_q = [-10, -9, -8, -7, -6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]$



# IPM电机：参数化扫描设置

## 5. ECER参数设置

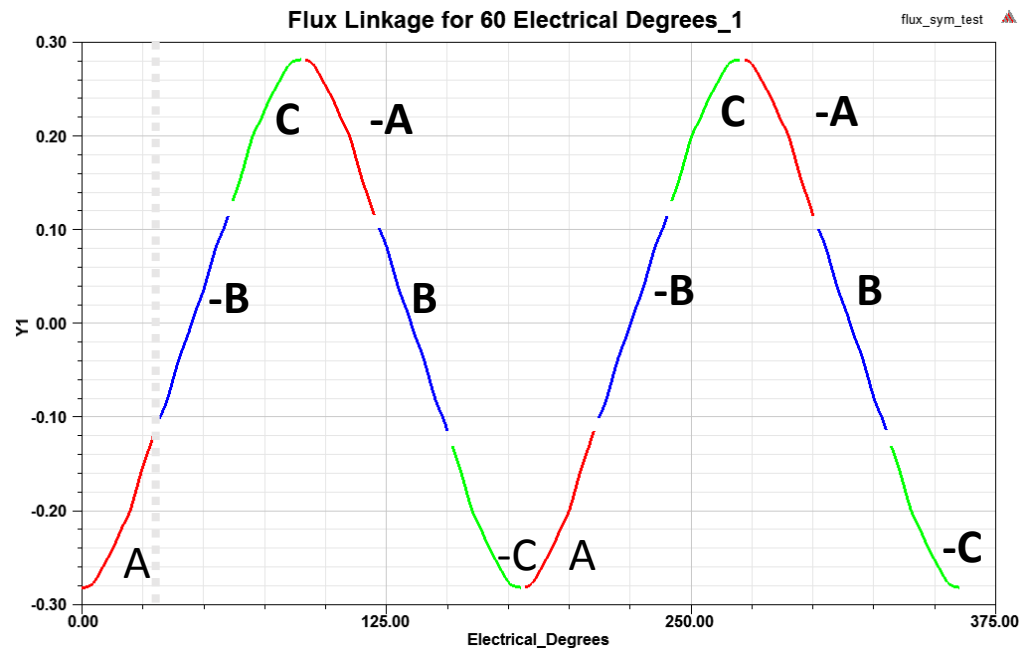
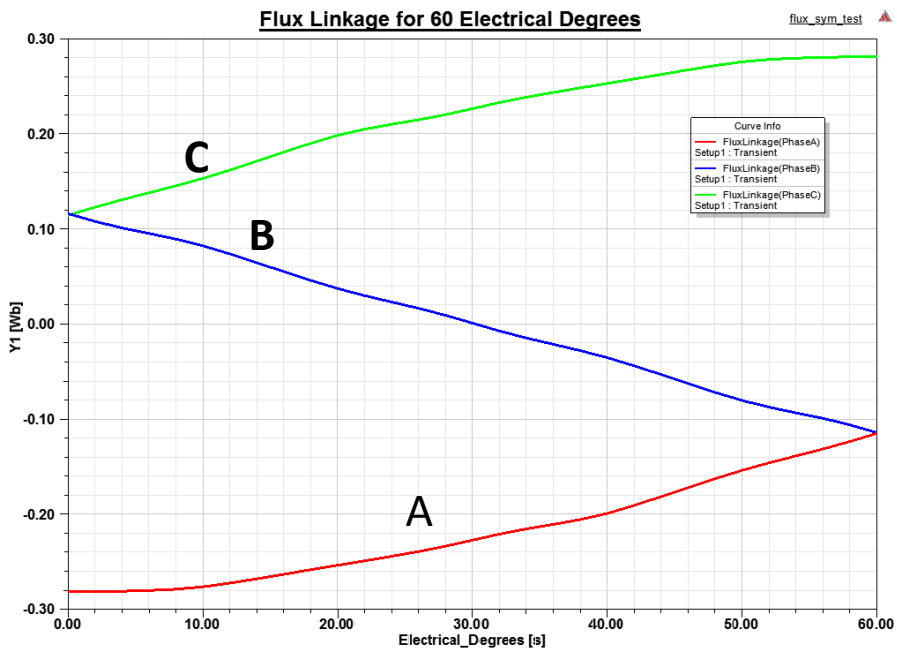
- 在所有“平衡”的案例中，需要对模型进行60度扫描；
- 设置“RotAngMax”等于60度电角度；
- 设置“RotAngIntervals”为合理的数字，如默认的12；
- 设置“Poles”等于模型的实际极数。



# IPM电机：60°模型扫描

## ■ 自动将60°数据进行重构：

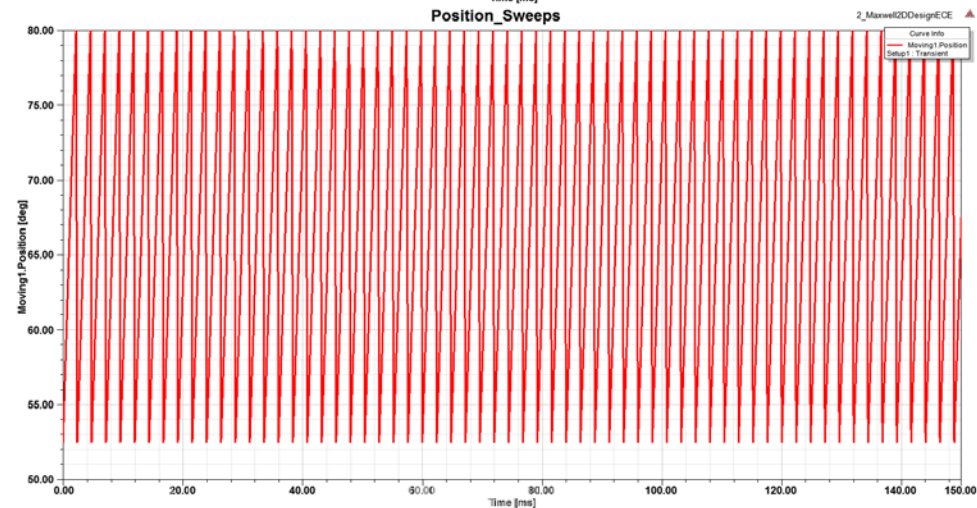
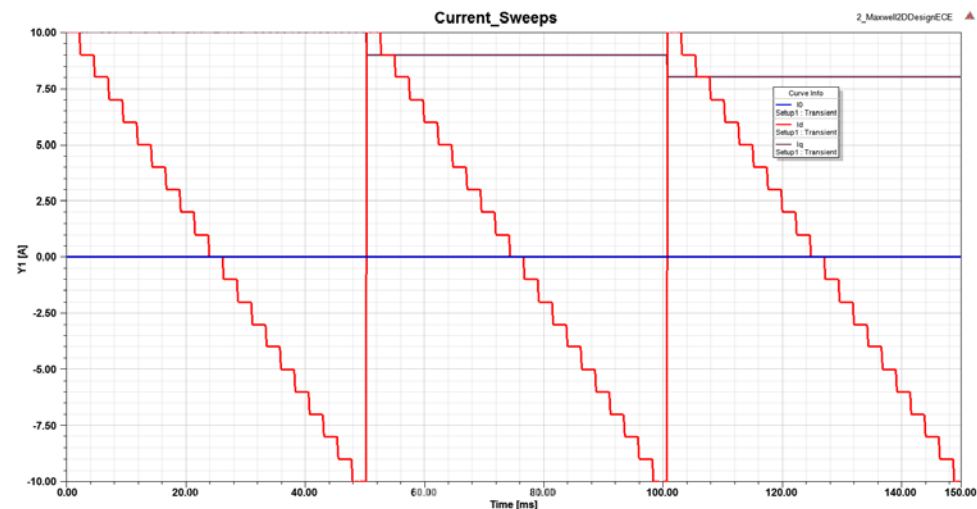
- PhaseA重构: A, -B, C, -A, B, -C, A, -B, C, -A, B, -C
- PhaseB重构: B, -C, A, -B, C, -A, B, -C, A, -B, C, -A
- PhaseC重构: C, -A, B, -C, A, -B, C, -A, B, -C, A, -B



60° 机械角度扫描 → Phase A 重构

# 输入参数扫描

■ 对输入参数进行扫描以计算磁链和转矩



■ DQ扫描总的变量数量:

- $(2 * CurrIntervals + 1)^2 * RotAngIntervals$
- $(2 * 10 + 1)^2 * 12 = \underline{5292}$

■ 三相扫描总的变量数量:

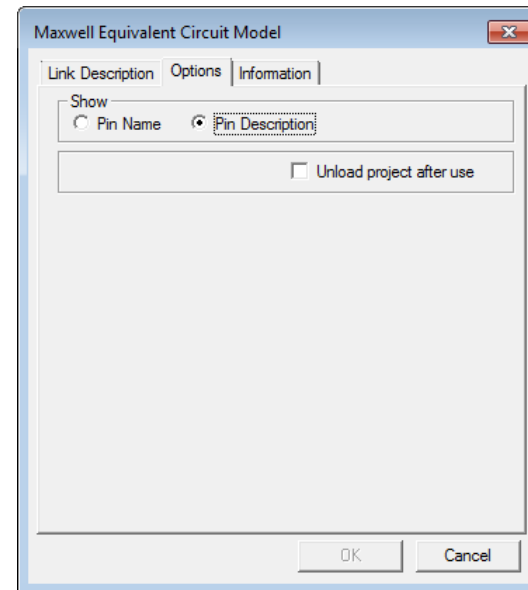
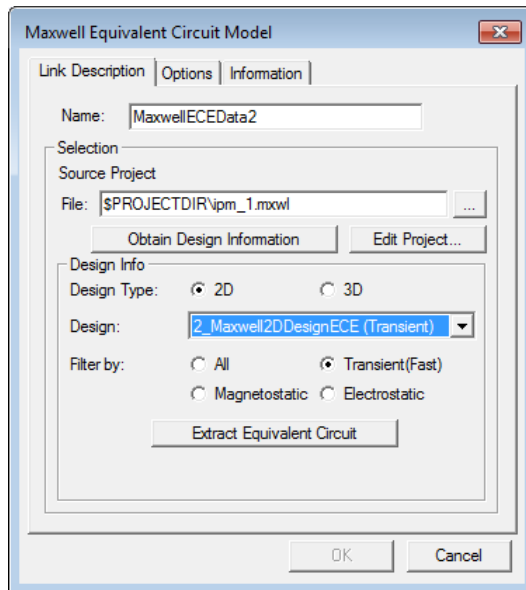
- $21^3 * 12 = \underline{111,132}$

*所以，采用DQ扫描可显著降低提取时间！*



# ECE模型与Simplorer进行集成

1. 保存Maxwell工程文件，打开或者关闭均可。
2. 进入Simplorer，进行如下操作：Simplorer Circuit > Subcircuit > Maxwell Component > Add Equivalent Circuit
  - 选择与ECE Solution 对应的Maxwell 工程；
  - 选择与ECE Solution 对应的Maxwell 设计；
  - 在弹出的对话框中选择 Show > Pin Description；
  - “Transient (Fast)” 必须默认勾选，然后单击 “Extract Equivalent Circuit”，确定。



# ECE模型与Simplorer进行集成

## 3. 搭建系统仿真分析模型

- 必须设置模型的相电阻 ( $ra0$ ) 和端部漏感 ( $la0$ )。

ECE1:MaxwellECData Properties: IPMECE - 2\_ECE

Quantities | Signals | Parameter Values | Property Displays

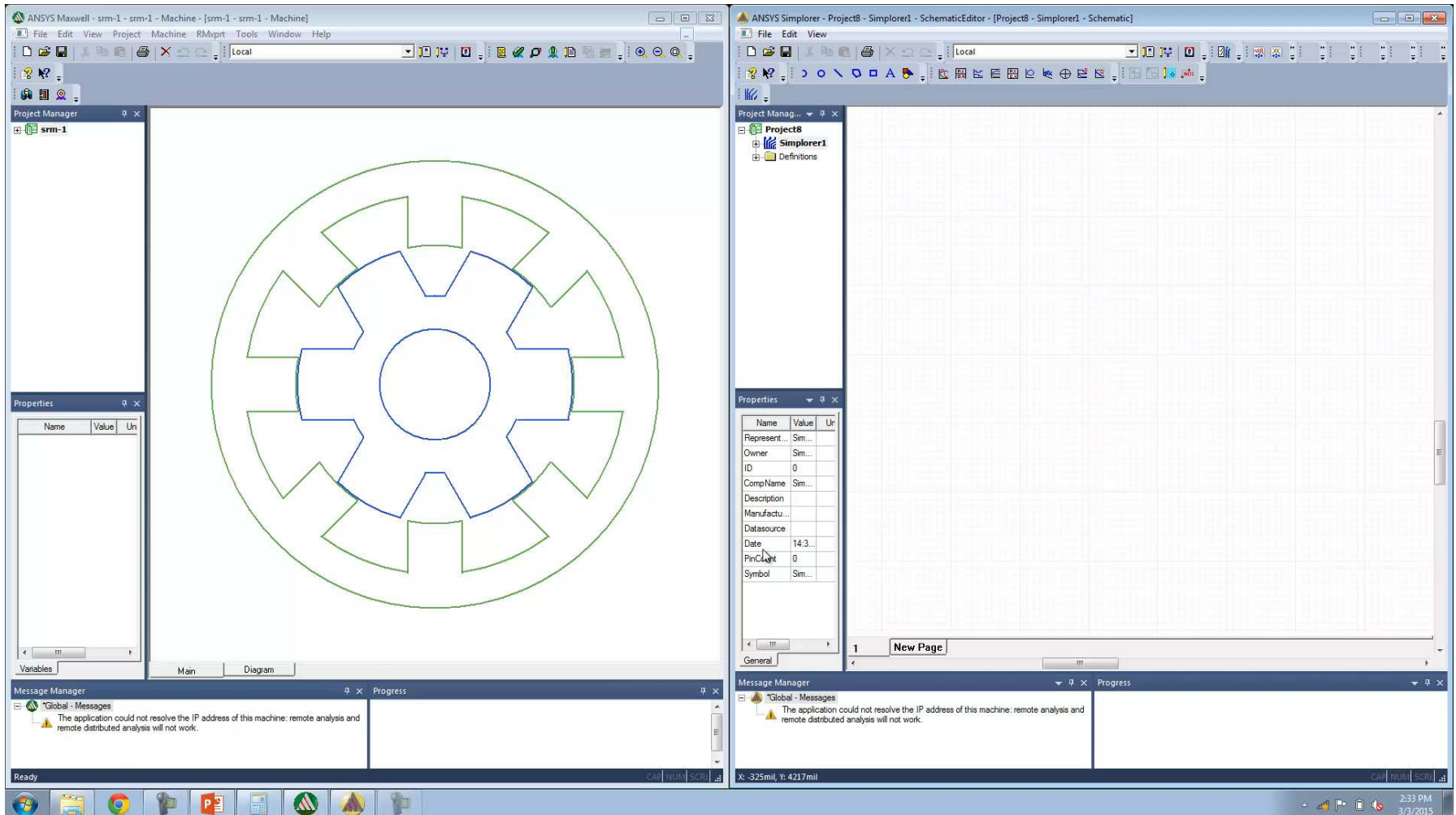
Value  Optimization  Tuning

Name	Value	Unit
ra0	2.60465	
la0	0.000623432	
Inila0	0	
Inilb0	0	
Inilc0	0	
Fluxa0	0	
Fluxb0	0	
Fluxc0	0	

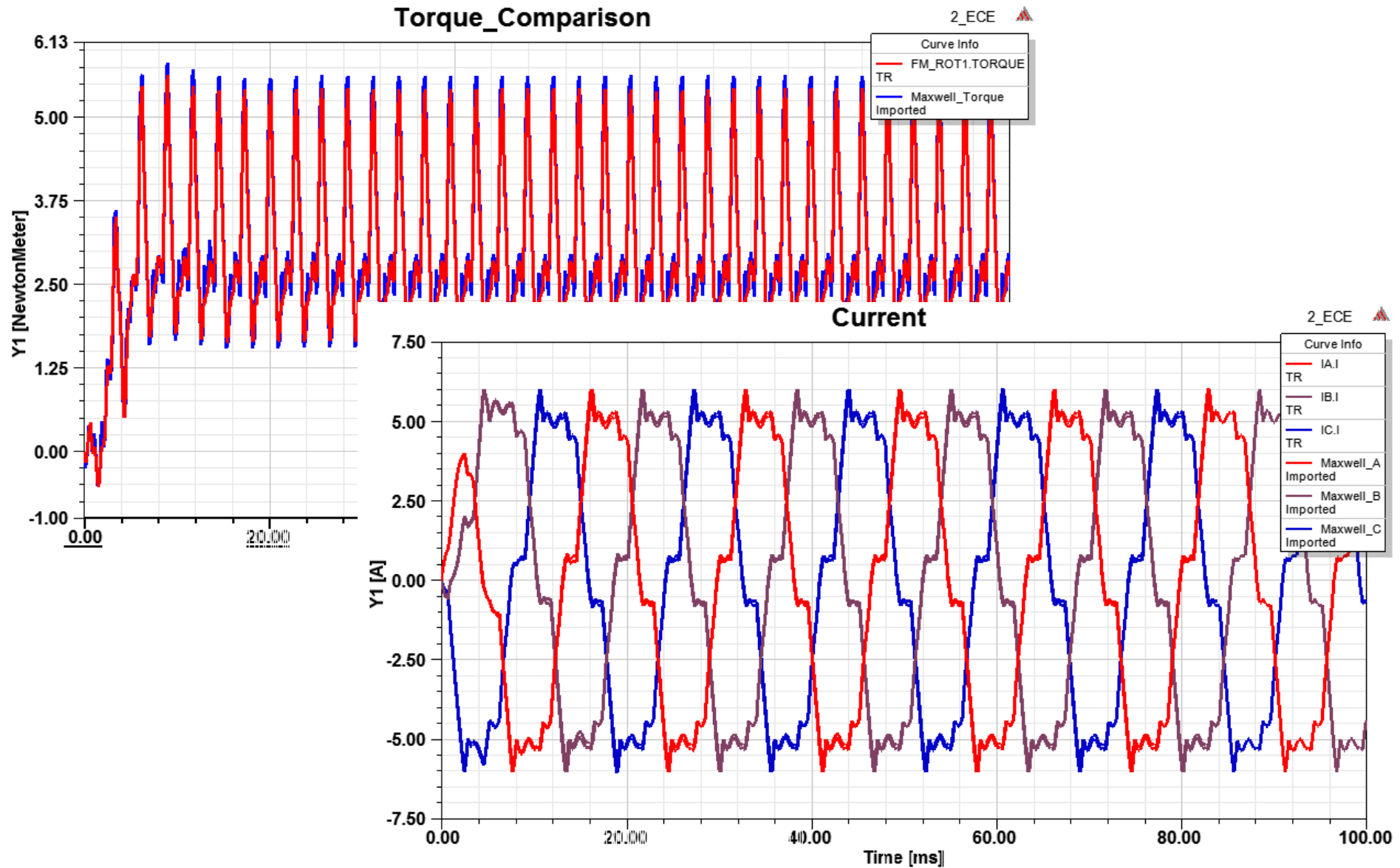
Parameters: RUse0, RUse1, RUse2, RUse3, RUse4, RUse5

# Simplorer系统仿真分析设置

- RMxpert可以自动生成Simplorer仿真分析模型

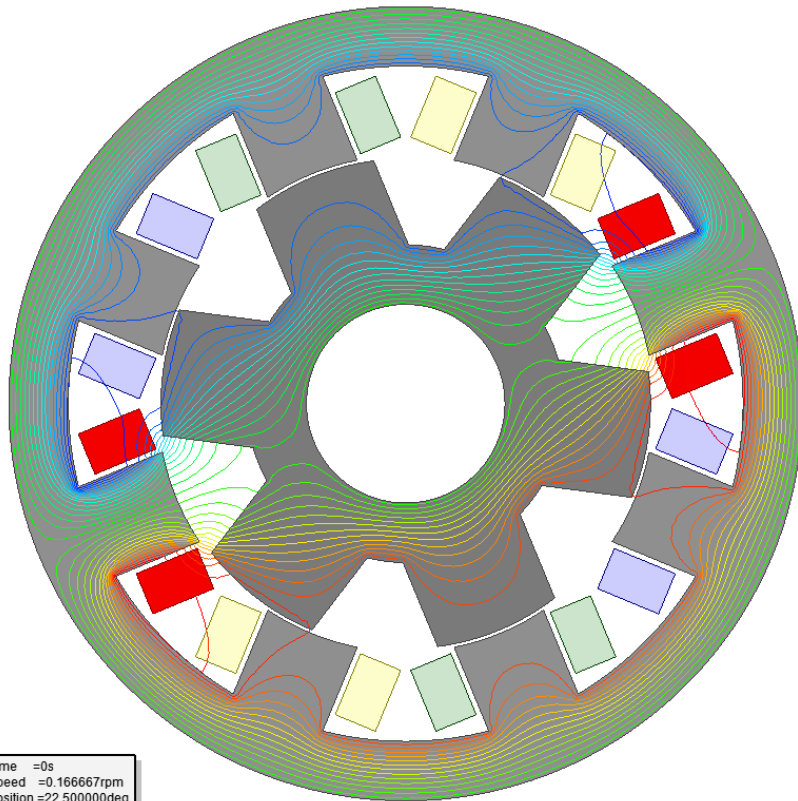


# ECE电路模型 VS Maxwell 瞬态仿真分析模型



# SRM 电机：如何进行ECE模型提取？

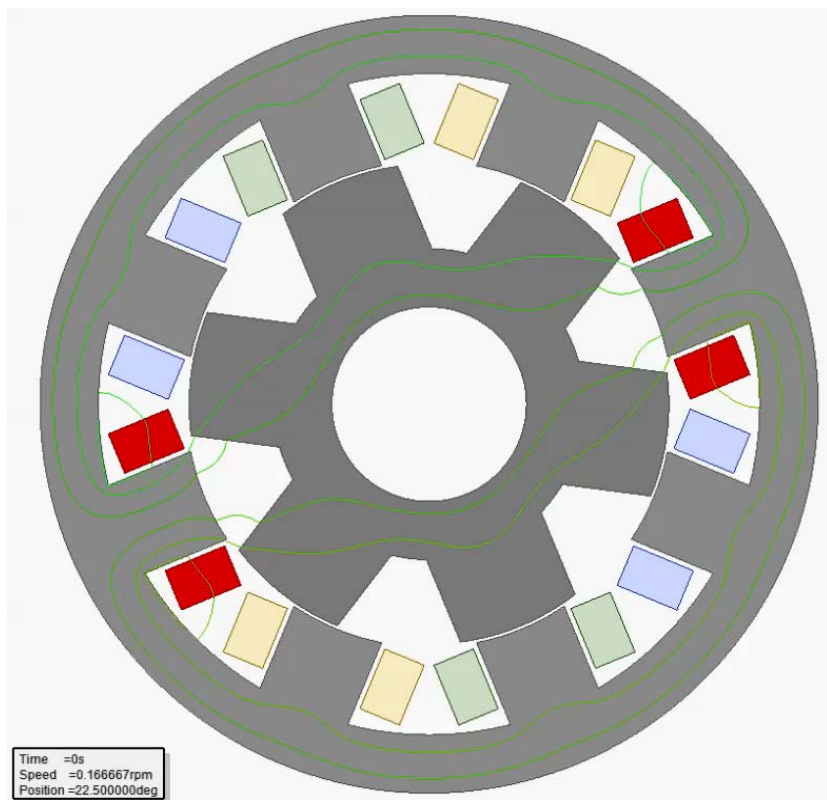
- 4 相 !!!，每相 N 个采样点；
- 1 个旋转轴，M 个采样点。



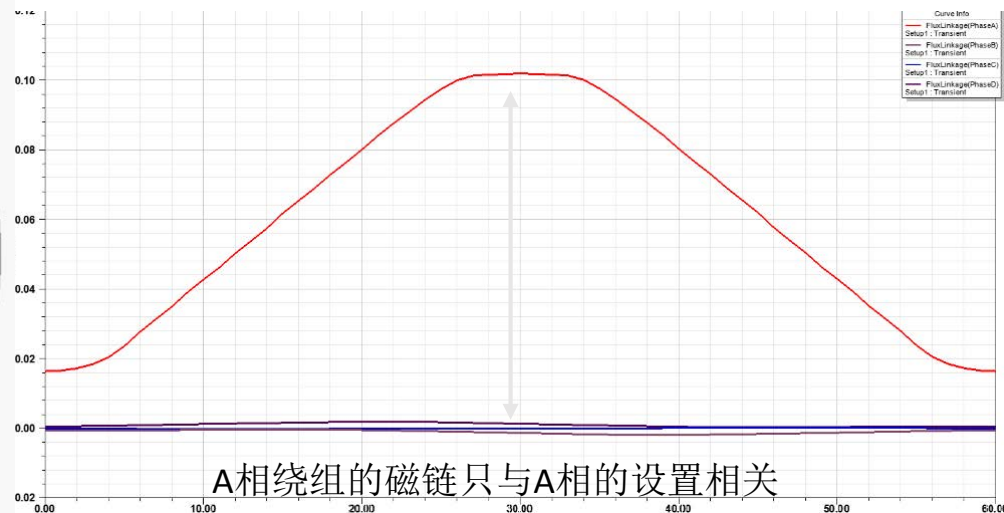
工作点扫描

调用DSO)。

# SRM电机：ECE Model Setup



A相绕组电感计算激活



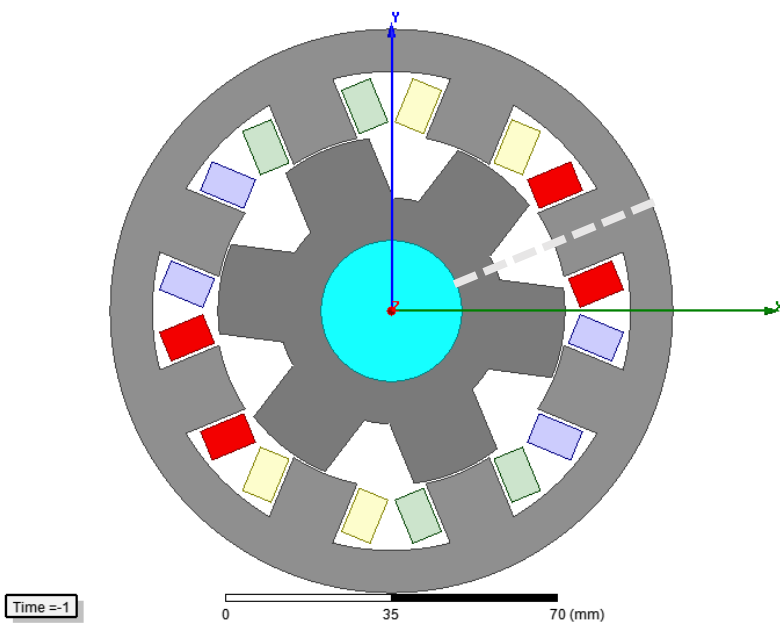
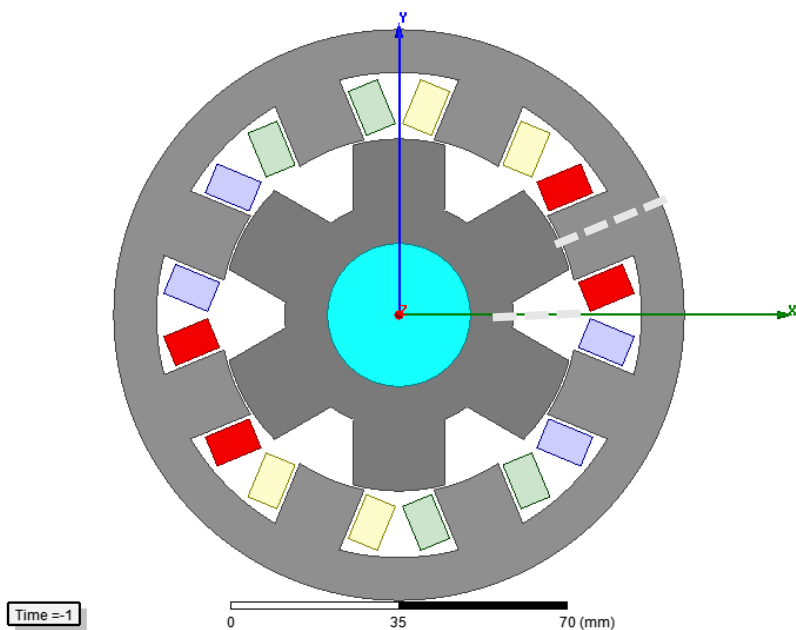
## ■ SRM电机各相绕组相对独立：

- 采样对象由多相简化到1相： N4→N1；
- B—D相数据可通过A相复制而来，然后添加固定机械角度延迟。

# SRM电机：对其磁链最小位置

## 1. 将A相与磁链最小位置对齐

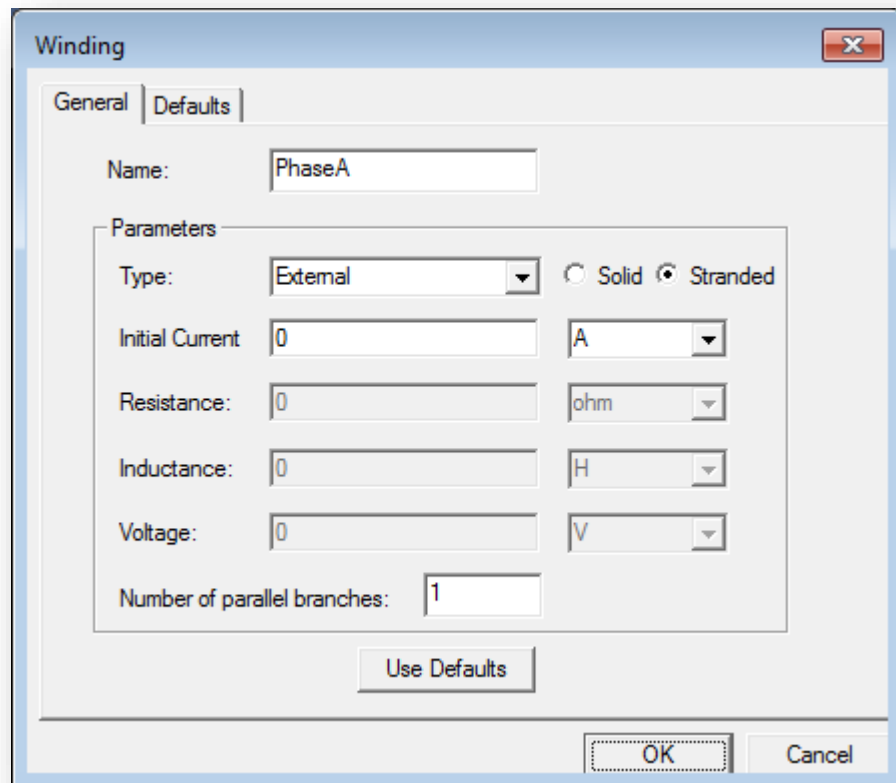
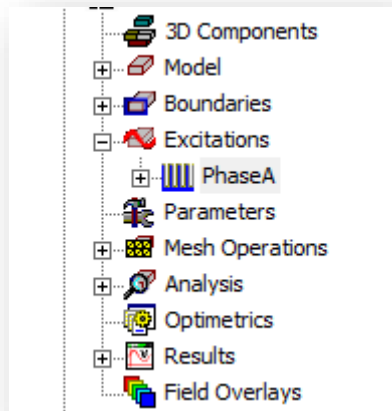
- 严格说并无必要，但是大多数SRM电机电路以上述位置作为控制策略判断的标准；
- 保持其他瞬态参数设置不变，如绕组、模型深度、对称性等。



# SRM电机：将激励设置为外电路

## 2.将激励设置为外电路

- 删除 B,C,D等不必要的相

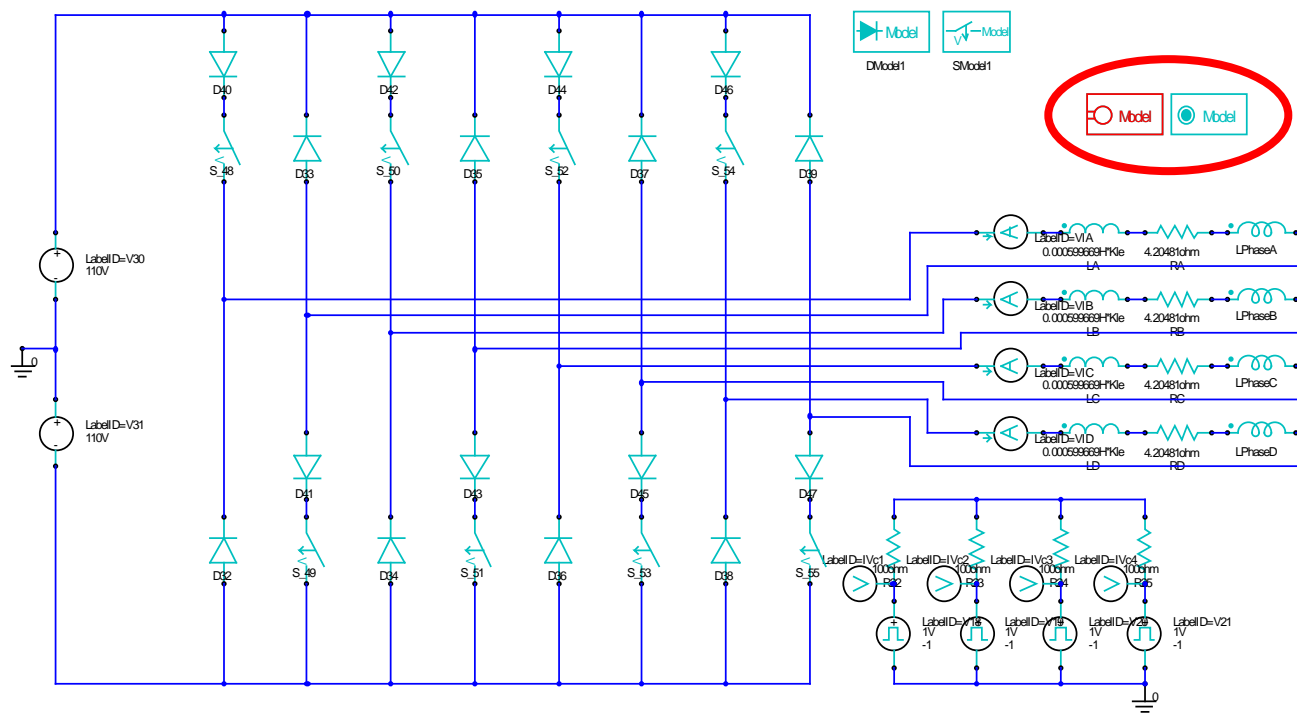




# SRM电机：编辑外电路

## 3.编辑外电路

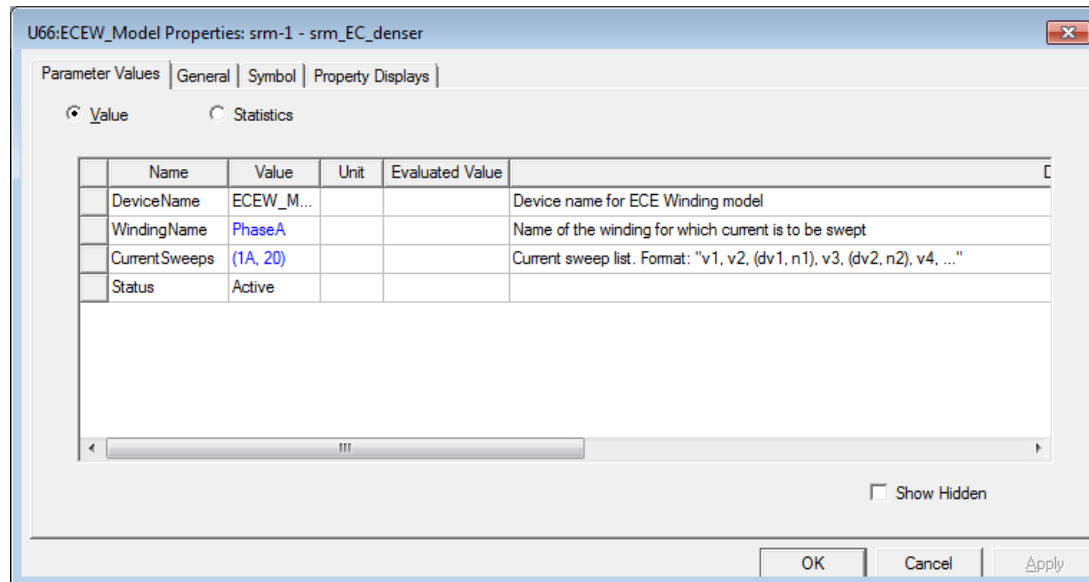
- 为A相添加ECEW模块，用于电流扫描；
- 添加ECER 模块用于位置扫描。



# SRM电机：ECEW模块设置

## 4. ECEW模块设置

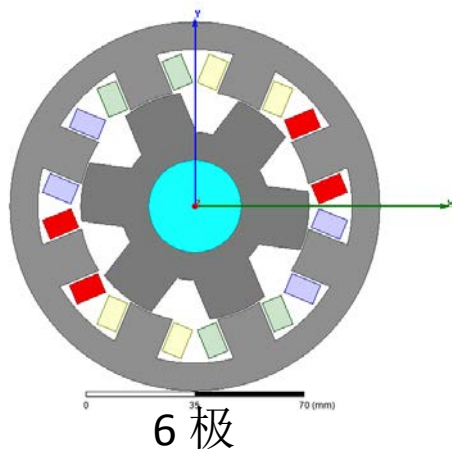
- 指定 *WindingName* 为 PhaseA, 必须与 Maxwell 中的名称一致；
- 指定电流扫描区间(1A,20), 本案例中电流扫描不为负；
- ECEW 没有 *SweepTypes* 选项, 所以 电流扫描将按照实际的设置进行扫描, 具体例子如下所示：
  - $I_a = (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20)$



# SRM电机：ECER模块设置

## 5. ECER模块设置

- 对于SRM电机，位置扫描必须至少为1对极；
- 本案例电机为6极，所以扫描的最小区间为 $60^\circ$ ；
- 设置 $RotAngIntervals$ 为合理的值；
- 设置 $Poles$ 为2 倍的 实际物理 Poles, 本案例设置为12.
  - ECER模块假设仿真分析结果将按照一个极对数 (120deg)进行全模型重构，但是实际仿真分析的时候只扫描了1个极，所以模型的 $duplication$ 需要设置为12.



U67:ECER\_Model Properties: srm-1 - srm\_EC\_denser

Parameter Values | General | Symbol | Property Displays

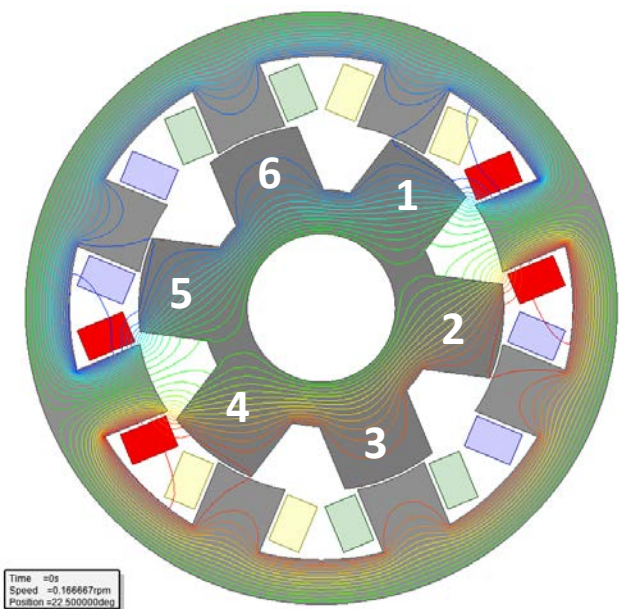
Value  Statistics

Name	Value	Unit	Evaluated Value	
DeviceName	ECER_Mo...			Device name for ECE Rotation model
RotAngMax	60	deg	60deg	Maximum rotating angle for sweeping in mechanical degrees
RotAngIntervals	60		60	Number of uniform sweeping intervals for rotating angle
SkewAng	0	deg	0deg	Skew angle of the stator or rotor core for 2D only, in mechanical degrees
Poles	12		12	Number of poles
Status	Active			

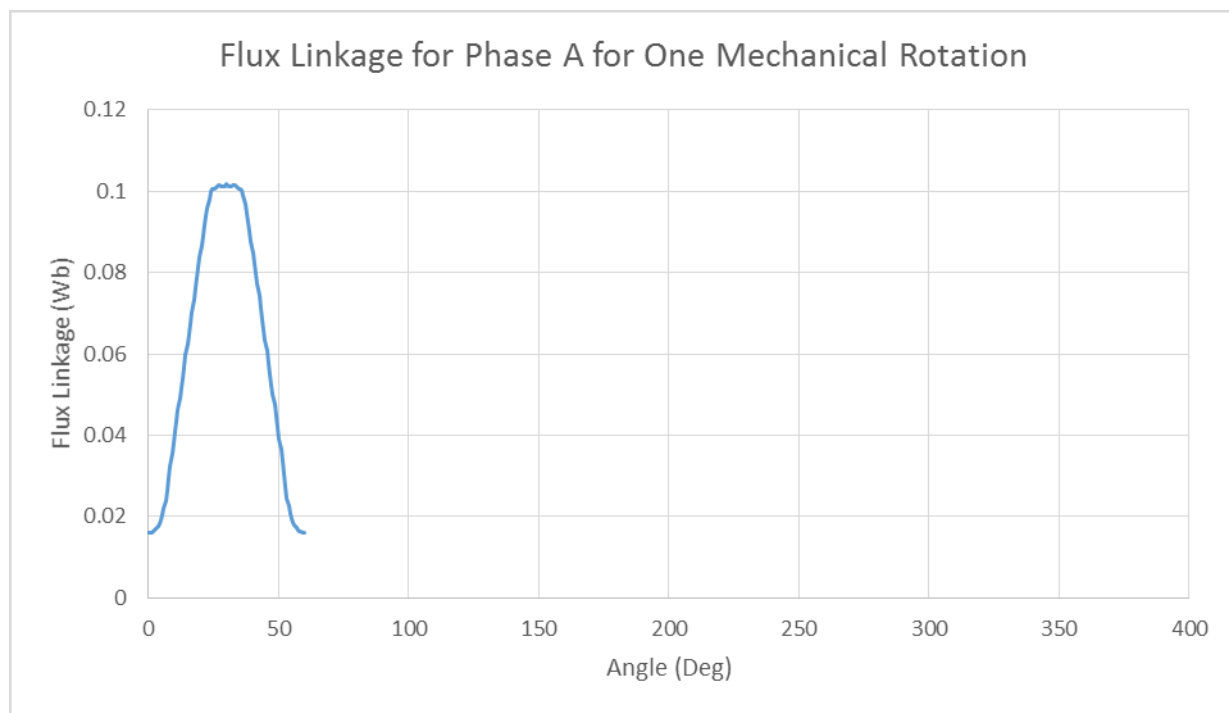
Show Hidden

OK Cancel Apply

# SRM电机：电气对称



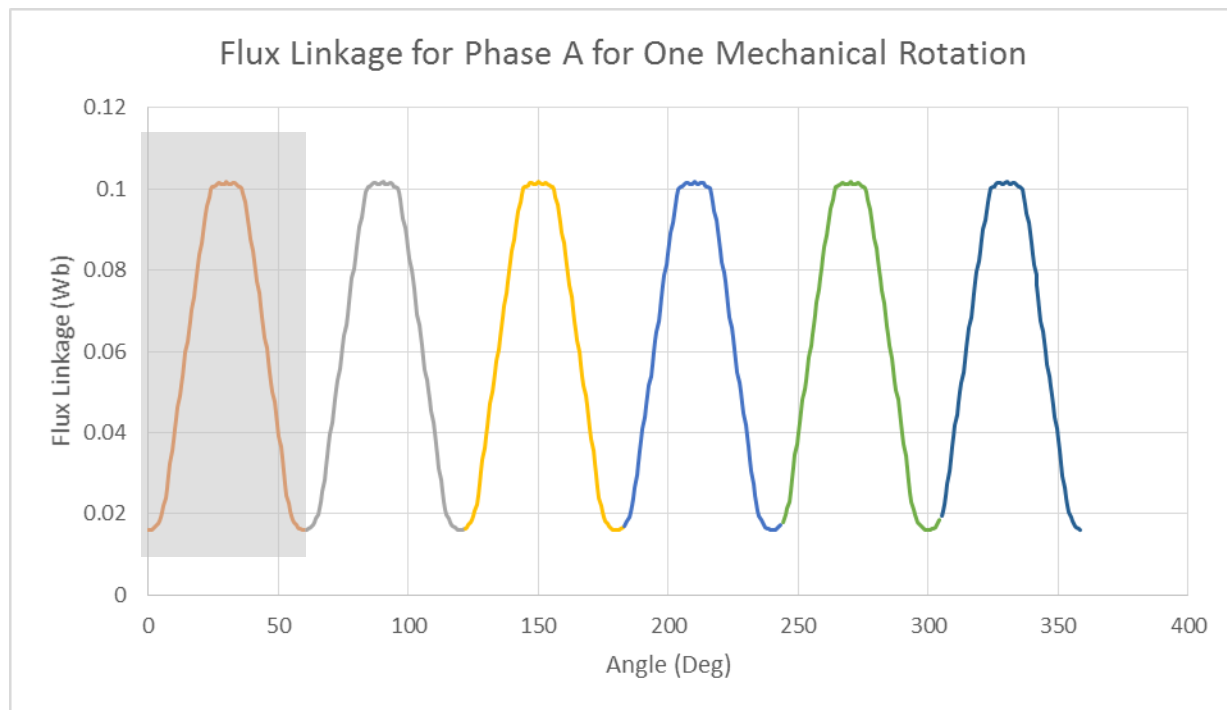
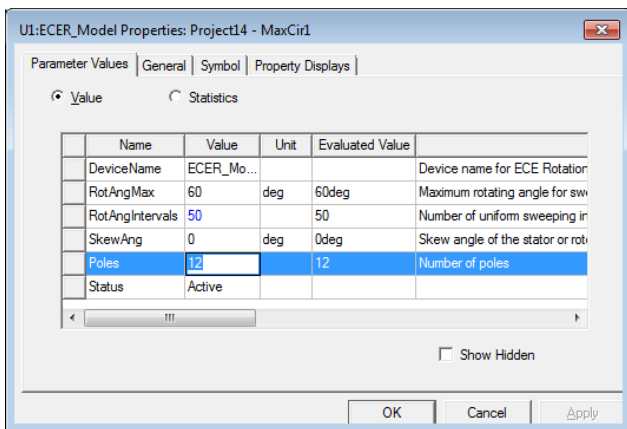
6 极电机



由于机械特对称，只需要进行60° 机械角的扫描。

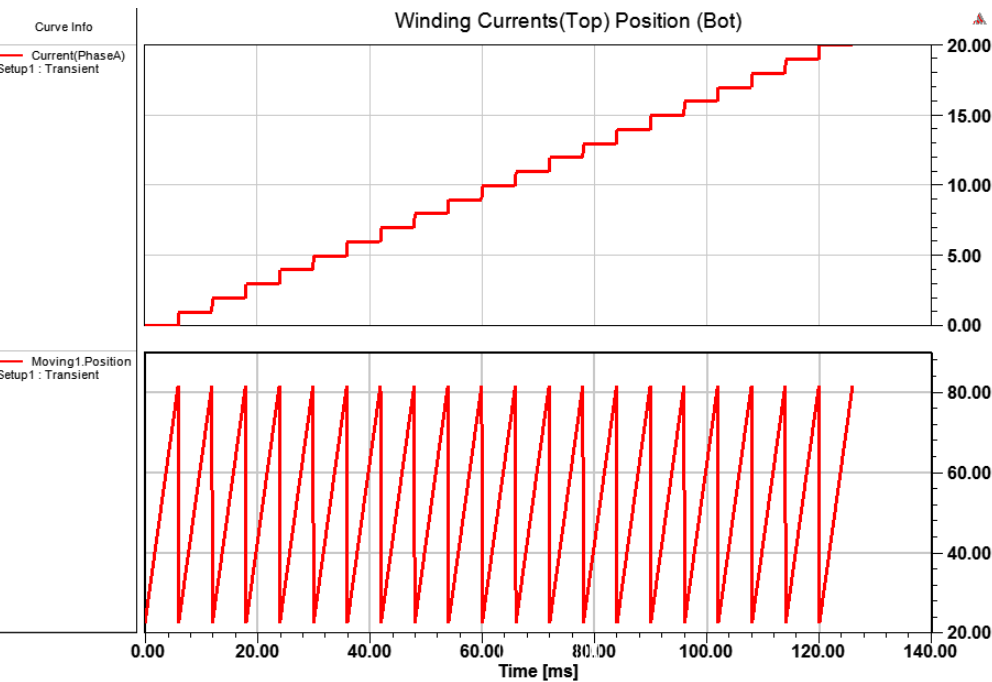
# SRM电机：电气对称性

- 对于SRM电机：设置Poles = 2倍物理 Poles



12极/60° 机械角重构与实际工况一致

# 输入参数扫描



■ 新方法扫描总的变量数量:

- $(CurrIntervals) * RotAngIntervals(20) * 60 = 1200$

■ 绕组扫描总的变量数量: :

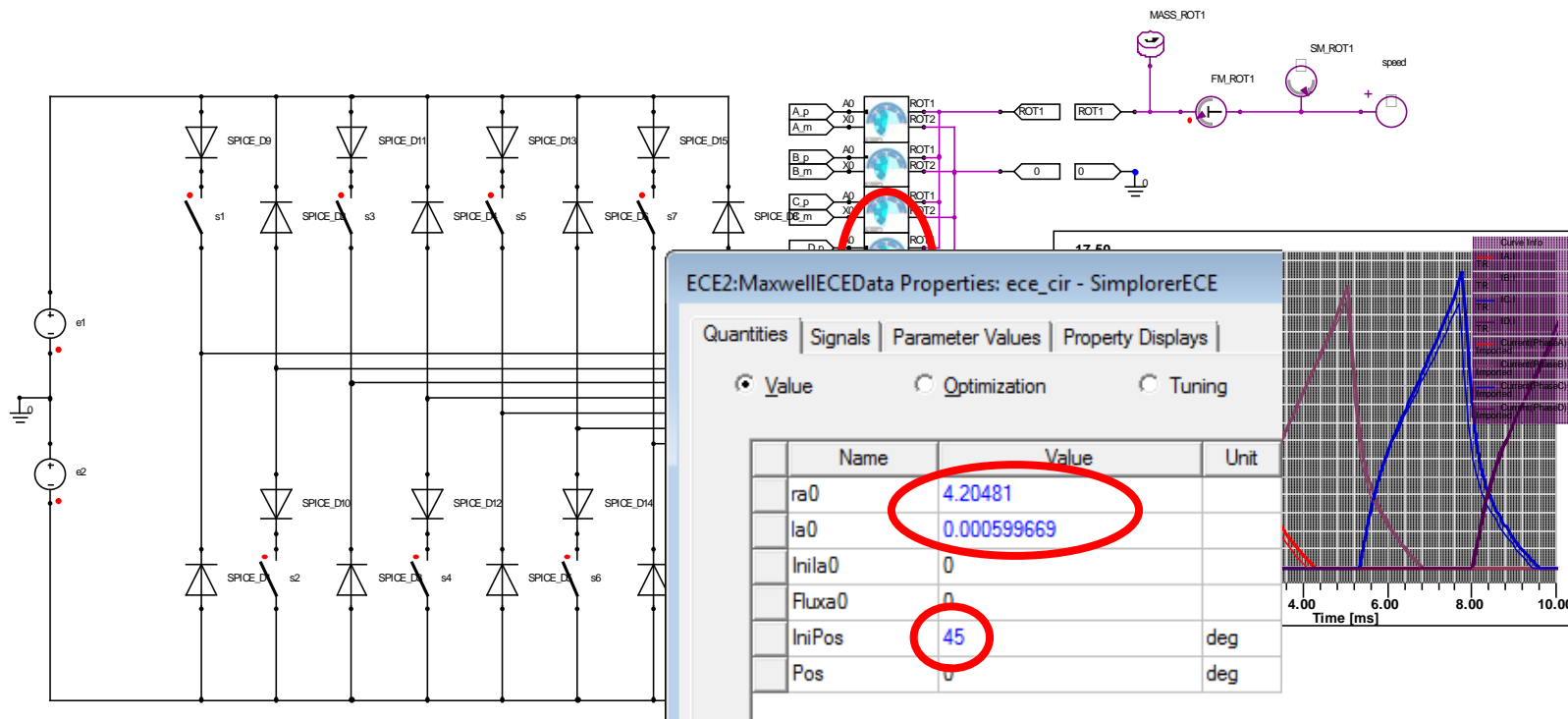
- $20^4 * 60 = 9,600,000$

*所以，采用新方法扫描可显著降低提取时间！*

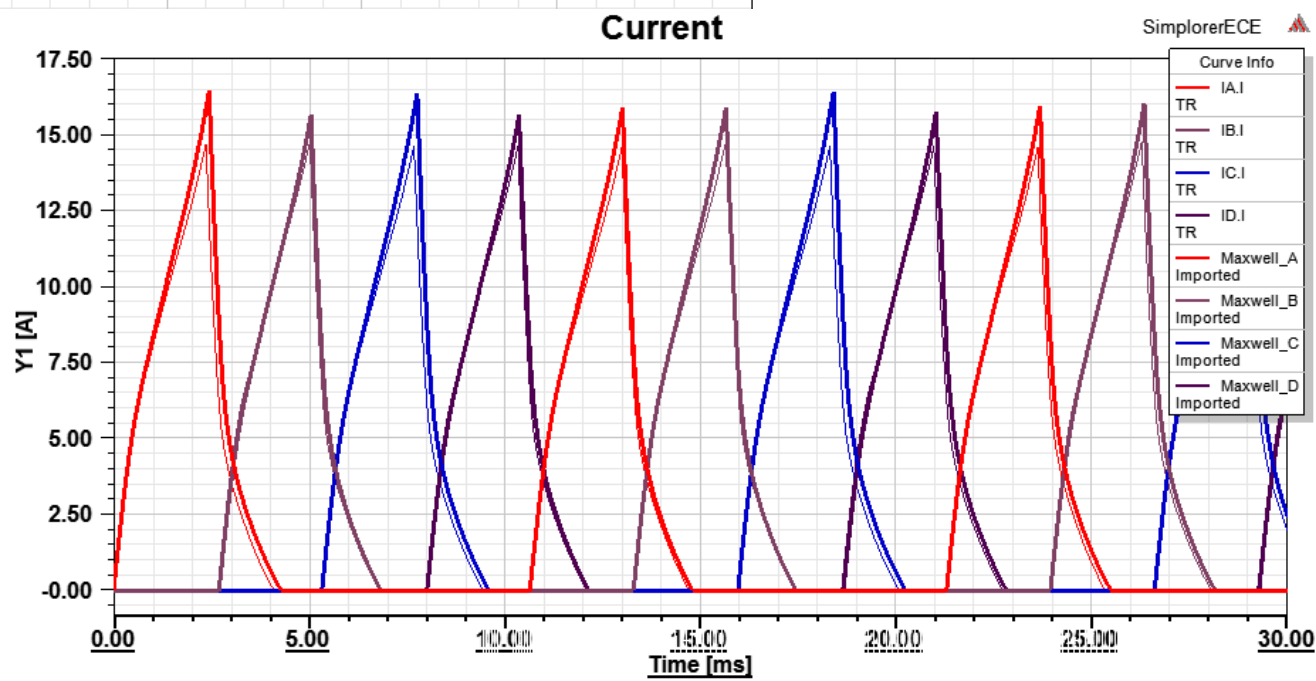
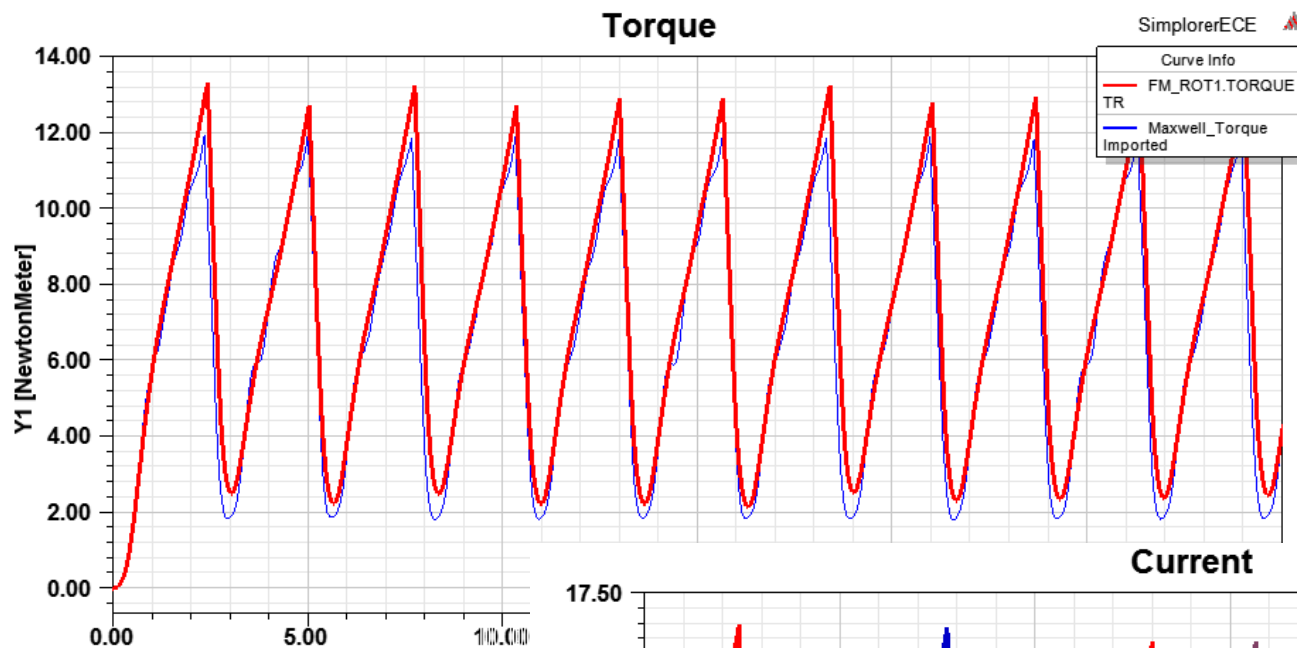
# ECE模型与Simplorer进行集成

## 1. 设置方法与IPM电机设置方法完全一致。

- Phase A 模型需要复制4次(PhaseA~PhaseD)；
- 确保添加绕组的相电阻和端部漏感( $ra0$ ,  $la0$ )；
- PhaseB,C,D 设置的时候可依次增加45 机械角度。



# ECE电路模型 VS Maxwell 瞬态仿真分析模型





# Demo

# THANK YOU

---



ANSYS®



ANSYS中国技术大会  
中国·上海

感谢聆听